

# Multi-Touch Querying on Data Physicalizations in Immersive AR

土居 大輝 国本 典晟 鈴木 彩門

## 1 はじめに

物理的なオブジェクトの、大きさや形状、表面の手触りといった物質的な特徴を 3D プリントとしてデータ表現するデータの物理化は、教育やコミュニケーションに利用されてきた。しかし、現在成功している氷河の融解や世界的なテロ統計などのデータの物理化は、様々な情報源からデータを伝達する能力は優れているが、ユーザがデータに動的に検索をかける対話的な探索を行うことができない。人間は本来の性質として、物理的な接触を通して学習しコミュニケーションを行うため、対話的な探索が可能なデータの物理化が重要である。この課題に対して、物理的要素と仮想的要素を組み合わせ、対話性と投影などの動的コンテンツの両方を提供するハイブリッドディスプレイを作成する方法 [1] がある。本論文では、この方法のような、物理的な要素を含みつつデジタルな入出力機構を使用して対話性を追加するあらゆる可視化をハイブリッド可視化と定義する。

本論文では、この方法を基に、没入型 AR と 3D プリントデータの物理化によるタッチセンシングの作成を組み合わせることで、対話的な探索を支援する新たな形の物理と仮想のハイブリッド可視化を提案する。

## 2 提案システム

### 2.1 概要

提案システムの概要図を図 1 に示す。提案システムは AR 可視化装置、マルチタッチ物理化装置、データホスト、タッチホストからなる。まず、ユーザは AR 可視化装置を装着し、データの物理化モデルとターゲットの画像をトラッキングすることで、AR コンテンツと物理化モデルを空間的に統合する。ユーザが物理化モデルをタッチすると、その入力センシングされ、VR・AR デバイスを抽象化して一元的に制御できるインタフェースである VRPN のサーバがあるタッチホストを中継して AR 可視化装置へ送られる。AR 可視化装置は各タッチポイントの適切な仮想的な可視化上の位置を計算する。その後、3D コンピュータグラフィックスの画像処理や可視化のためのライブラリである VTK があるデータホストに対して、VTK データクエリを生成し HTTP リクエストとして送信する。クエリの結果はデータホスト上の VTK により計算され、データの 3D コンピュータグラフィックスが AR 可視化装置へ送り返さ

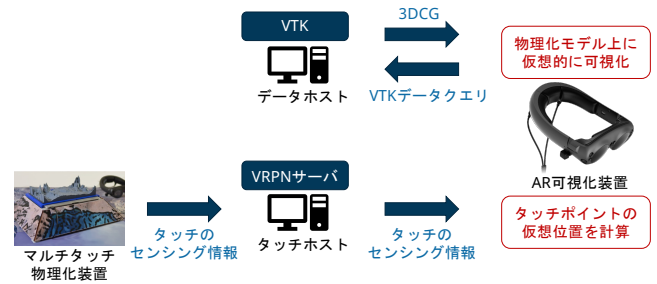


図 1: 提案手法の概要図

れる。最後に、AR 可視化装置は返された 3D コンピュータグラフィックスを仮想的に可視化する。

### 2.2 AR 可視化装置

ユーザの視線に対するデータの物理化モデルの位置と回転を常に統合するために、パッシブ・インサイド方式によるオブジェクトのトラッキングを行う。パッシブ・インサイドアウト方式では、物理化モデルとターゲットの平面画像を同時にカメラの視界に配置することでトラッキングが可能であり、持ち運びと検知範囲の点でパッシブ・アウトサイドイン方式よりも優れている。

この方式では一度 AR マーカを読み込んだ後、AR 可視化装置の位置と向いている角度から AR 表示の位置を調整する 6DoF トラッキングに切り替えるが、定期的に AR マーカを再度読み込ませないとトラッキングの精度が低くなる。そのため、AR マーカをどの角度から見ても読み込める位置に置く必要がある。一度に読み込む AR マーカの枚数と遅延のトレードオフについて調べると、遅延は枚数が少ないほど短く、精度は 1 枚でも十分であったため、一度に読み込む AR マーカの数は少ない方が良かった。しかし、全ての角度から 1 枚の AR マーカを読み込むことは不可能であるため、傾斜角が 40° のピラミッド型の各側面の中心に AR マーカを貼ったステージを使用する [2]。

### 2.3 マルチタッチ物理化装置

3D プリンタで出力した物理化モデルに対するマルチタッチを認識するために、半径 0.75cm の六角柱に分割した物理化モデルを高解像度の感圧センサ上に配置する。半径 0.75cm は人間の指先の半径に近い大きさでありながら、物理化モデルの列の数が管理しやすい大きさである。また、六角形は正方形や長方形と比較して視覚的に硬直した印象を与えづらいため採用した。

特定の六角柱が押し下げられた際に、六角柱の端が互いに接触することによって、複数のタッチポイントが登録されてしまうゴーストタッチが発生する場合がある。提案システムでは、2本の指が同じ六角柱に触れることはないと仮定し、直径が1.5cmよりも小さいタッチポイントが登録された場合、その複数ポイント内で最も大きな力で押し下げられた点のみを残してその他は排除することでゴーストタッチを防ぐ。また、物理化モデルの重みなどの物理的要因でのゴーストタッチを防ぐため、他のタッチポイントよりも力が5倍以上小さく、力が0.98N未満のものは無視する。

### 3 評価

#### 3.1 タッチ精度

提案システムのデータの物理化によるタッチ精度の低下の影響を評価するため、タッチターゲットへのポインティングの8名の被験者実験を行なった。被験者は、30回のタッチの訓練課題の後、直接感圧センサにタッチするnophysの30回と感圧センサ上の物理化モデル越しにタッチするphysの30回を、それぞれを1セットずつ行なった。学習効果を最小にするため、nophysとphysの順は4名ずつ入れ替えた。タッチターゲットは直径5mmで、24cm x 13.85cmの感圧センサにランダムな一様分布で上から投影される。physでは、ランダムに分布する50個のガウス峰により、最大高さ8mmの凸凹面を持つ地形データを物理化し、その上にタッチターゲットを投影する。タッチターゲットは一つずつ投影され、あるポイントへのタッチが完了すると次のポイントを表示する。各タッチターゲットの正解座標とタッチ座標のユークリッド距離を測定し、条件間での平均のタッチ精度を測定した。

実験の結果を図2に示す。phys ( $\mu = 3.22\text{mm}$ ,  $\sigma = 2.1\text{mm}$ )と比較して、nophys ( $\mu = 3.09\text{mm}$ ,  $\sigma = 1.64\text{mm}$ )ではより正確にタッチすることができた。しかし、ウィルコクソンの符号順位検定の結果、データの物理化はタッチ精度に有意な影響を及ぼさず ( $p = 0.753$ )、「条件間の平均タッチ精度に差がない」という帰無仮説は棄却できなかった。

#### 3.2 南極気候科学への応用

データの物理化の実際の科学における可能性を評価するため、南極大陸にあるフィルヒナー・ロンネ棚氷の融解速度を研究する気候科学者にデータの物理化を用いた研究を行ってもらい、思考発話法によるインタビューを行なった。データの物理化の対象は、気候科学者との相談に基づき、945km x 545kmの小区画を選択した。元の座標空間からステレオグラフ投影、60倍の垂直方向の拡張、感圧センサのサイズへの切り抜きと拡大縮小等の変換を行い、2.3節で説

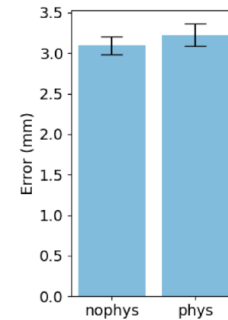


図2: タッチ精度の実験結果

明するように六角柱に分割した。表面データの六角柱は高さ0.15mmで3Dプリントし、247個の表面データの合計プリント時間は約2日だった。物理的な可視化と仮想上の可視化の位置合わせを行うトラッキング画像にはNASAの衛星画像を使用しており、南極大陸の鳥瞰図に対するデータと物理化モデルの位置と向きが追加されている。

気候科学者へのインタビューは、構築したシステムを使用してもらい、システムの能力を示すための一連の導入タスクを行う中で、思考発話法により行なった。さらに、システム全体に対する建設的な批判とシステムの使用状況に関するフィードバックの両方を促す質問を、気候科学者の探索プロセス全体にわたって行なった。インタビューの結果、データが物理的に重なるため直感的理解に役立ち、このシステムを中心としたチームメンバの相互的なコミュニケーションに役立つ可能性がある旨指摘された。また、物理化モデルは細かな探索の対象となる主要なデータそのものではなく、3次元の空間マーカとして、より関心のある周辺の対象への方位確認等に用いられていた。

### 4 まとめと今後の課題

現在のデータの物理化はデータを伝達する能力は優れているが、ユーザがデータに動的に検索をかける対話的な探索を行うことができない。本論文では、没入型ARと3Dプリントデータの物理化によるタッチセンシングの作成を組み合わせることで、対話的な探索を支援する物理と仮想のハイブリッド可視化を提案した。タッチ精度の評価と南極気候科学への応用の実験により、提案システムの有効性を示した。

### 参考文献

- [1] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic and Jean-Daniel Fekete, Evaluating the efficiency of physical visualizations, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2593-2602, 2013.
- [2] Daniel F Abawi, Joachim Bienwald and Ralf Dörner, Accuracy in optical tracking with fiducial markers: an accuracy function for ARToolKit, *Third IEEE and ACM International symposium on mixed and augmented reality*, pp.260-261, 2004.